

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЕФЕКТΟΣКОПОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕ- И ГАЗОПРОВОДОВ

Н. Б. Вавилова¹, А. А. Голован², А. В. Козлов³, И. В. Никитин⁴, А. А. Панёв⁵, Н. А. Парусников⁶
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Лаборатория управления и навигации,
Москва, Россия, e-mail: aagolovan@yandex.ru

И. А. Соловых⁷, С. В. Никифоров⁸, А. М. Лавырев⁹, С. В. Морозов¹⁰, А. В. Афанасьев⁹
ОАО «Оргэнергогаз» «Саратоворгдиагностика», Саратов, Россия

И. В. Весновский⁹, А. В. Конон¹¹, А. А. Лаптиев¹⁰, Д. В. Турусиков¹⁰
АО «Бейкер Хьюз технологии и трубопроводный сервис», Луховицы, Россия

Аннотация

Ключевые слова: внутритрубные снаряд, задача навигации дефектоскопа, фильтр Калмана

Приведены методика и алгоритмы решения задачи навигации внутритрубного диагностического снаряда. Основу навигационной системы снаряда составляет бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС), а в качестве корректирующей информации используются данные о координатах реперных точек и данные одометра. Рассмотрены вопросы подготовки и проведения экспериментов, правила экспресс-диагностики, позволяющие существенно повысить скорость и качество проведения экспериментов. Приведены результаты обработки экспериментов.

Введение

Проблема пространственной привязки дефектов нефте- и газопроводов возникает при выполнении регламентных диагностических работ, для чего используются внутритрубные диагностические (инспекционные) снаряды - дефектоскопы.

Для решения задачи навигации дефектоскопа на его борту используются инерциально-измерительные модули (ИИМ), одометры. Дополнительной информационной составляющей задачи служат координаты маркерных точек (маркеров), прохождение которых фиксируется датчиками дефектоскопа. В режиме постобработки на основе показаний инерциальных датчиков ИИМ (акселерометров, датчиков угловой скорости (ДУС)), показаний одометров, координат маркеров, строится интегрированное навигационное решение ИИМ-одометры-маркеры. Результатом решения служат три пространственные координаты дефектоскопа – широта, долгота, высота, а также углы ориентации корпуса дефектоскопа – углы курса, крена, тангажа.

Стремление уменьшить массогабаритные характеристики, энергопотребление ИИМ, их стоимость, сохранения требования по точности работ, заставляет разработчиков обращать внимание на использование инерциальных датчиков среднего класса точности, доступных на рынке.

В 2010 г. на XVII Санкт-Петербургской международной конференции МКИНС-2010 был сделан доклад [1] по результатам совместной МГУ - «Везерфорд трубопроводный сервис» разработки макетного образца навигационной системы дефектоскопа. Достигнутая в экспериментах точность навигации удовлетворила заказчика работы. В последующие годы совместная работа по доработке программного навигационного обеспечения продолжилась [2], сейчас коллектив разработчиков дефектоскопа относится к компании АО «Бейкер Хьюз технологии и трубопроводный сервис».

В 2012-2014 гг. проводились аналогичные совместные работы МГУ - Оргэнергогаз Саратоворгдиагностика. Первый навигационный прогон дефектоскопа в трубе состоялся июне 2014 г., достигнутые точности навигационных определений в основном соответствуют требуемым.

Работы МГУ по разработке программно-математического обеспечения задачи навигации дефектоскопов, обучению специалистов, проводились независимо с указанными компаниями в разные годы. Объ-

¹ Кандидат физико-математических наук, в.н.с.

² Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией.

³ Кандидат физико-математических наук, с.н.с.

⁴ Аспирант.

⁵ Кандидат физико-математических наук, в.н.с.

⁶ Доктор физико-математических наук, профессор.

⁷ Начальник филиала.

⁸ Заместитель начальника отдела.

⁹ Ведущий инженер.

¹⁰ Инженер.

¹¹ Начальник отдела.

диняет эти работы общий информационный подход к задаче навигации дефектоскопа, согласно которому показания инерциальных датчиков используются для инерциального счисления, а показания одометров и информация о координатах маркеров служит коррекционной информацией.

В дальнейшем изложении основной акцент делается именно на информационной составляющей задачи навигации дефектоскопов нефтяных и газовых труб.

Типовой состав навигационной системы дефектоскопа

В состав навигационной системы дефектоскопа входят:

- Инерциально-измерительный модуль, включающий три датчика угловой скорости (обычно используются волоконно-оптические датчики) и три акселерометра. Компания Оргэнергогаз Саратоворгдиагностика использует БЧЭ-500 компании «Оптолинк» [8] и акселерометры АТ1104 разработки «Темп-Авиа» [9]. Компания «Бейкер Хьюз Технологии и Трубопроводный Сервис» использует схожие по классу точности инерциальные датчики.

- Одометры, обычно с минимальным разрешением пройденного пути 3 мм (реже 5 мм).

Дополнительной информационной составляющей системы навигации служат данные о координатах маркеров.

Методика подготовки, проведения навигационных экспериментов, экспресс-диагностики экспериментальных данных

В рамках совместных работ была разработана методика подготовки, проведения навигационных экспериментов, экспресс-диагностики экспериментальных данных. Она включает в себя:

- Методику калибровки инерциальных датчиков ИИМ на грубом одноосном стенде с горизонтальной осью вращения [3] с целью проверки соответствия точностных характеристик ИИМ паспортным. План калибровки состоит из трех циклов вращения ИИМ в сборе. На каждом цикле ИИМ крепится к платформе стенда таким образом, чтобы соответствующая приборная ось БИНС была примерно параллельна оси вращения стенда. Три цикла вращения соответствуют установке каждой приборной оси ИИМ по оси вращения стенда (рис. 1).

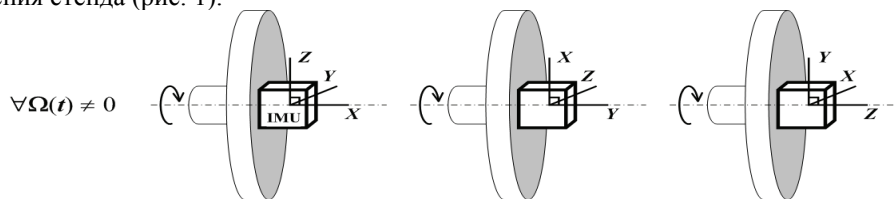


Рис. 1. Схема последовательных циклов вращения ИИМ

При проведении калибровочных экспериментов от стенда не требуется никакой информации о параметрах вращения, единственно, что используется – приблизительное значение угла азимута оси вращения. В решении задачи калибровки используются только показания акселерометров и ДУС ИИМ. Результатом калибровки служат оценки смещений нулевых сигналов инерциальных датчиков, перекосы их осей чувствительности, масштабные коэффициенты. Далее оценки указанных параметров учитываются в основном навигационном режиме ИИМ. В ряде случаев, проведенная докалибровка позволила значительно улучшить результаты навигации.

- Методику верификации привязки координат маркеров к траектории движения дефектоскопа. Для определения координат маркеров используется технология DGPS, однако в ней присутствует человеческий фактор. Для верификации сравнивается расстояние между маркерами (на участках с малой кривизной) вычисленное по показаниям одометра и по GPS-координатам маркерных точек.

- Методику верификации точностных характеристик ИИМ, используя результаты решения задачи начальной выставки.

Начальная выставка

Задача начальной выставки ИИМ в рассматриваемом приложении имеет свои особенности. Приведём их:

- Временной интервал выставки не имеет жестких временных ограничений.
- Имеется возможность задания начального курса. Для этого устанавливаются два маркера – в начале и конце запускной камеры. При помощи технологии DGPS определяются азимутальный угол базового вектора, соединяющего эти точки, который далее может быть использован как внешний курс.
- Выделяются три временных интервала при запуске дефектоскопа в камеру.

Первый интервал – помещение дефектоскопа в камеру, подача питания в аппаратный комплекс. На этом интервале поведение инерциальных датчиков нестабильно из-за саморазогрева ИИМ. Запуск газа (нефти) в камеру. Этот этап характеризуется сильным вибрационным воздействием, в условиях которого решать задачу выставки нецелесообразно. На третьем этапе решается задача начальной выставки ИИМ – вибрационное воздействие отсутствует, саморазогрев датчиков завершён. Время этапа обычно составляет 10 мин и более. Следовательно, для старта начальной выставки необходимо алгоритмически определять начало третьего этапа. Для этого могут быть использованы, например, процедуры сглаживания инвариантных характеристик показаний инерциальных датчиков. Далее, по показаниям акселерометров определяются значения углов крена и тангажа, по показаниям ДУС (при соответствующем классе точности ИИМ) определяются значения истинного курса и широты места.

На основе сравнения значений оценок угла курса и широты со «спутниковым» углом курса, известной широтой места, возможно оценить класс точности ДУС, их соответствие паспортным значениям. Можно показать, что разность между известной широтой места φ и ее оценкой, полученной на начальной выставке пропорциональна отношению комбинации северного v_N , вертикального v_{UP} дрейфов к угловой скорости u вращения Земли:

$$\Delta\varphi = \varphi - \hat{\varphi} = \frac{v_N \sin \varphi + v_{UP} \cos \varphi}{u}.$$

Аналогично по показаниям ДУС можно оценить дрейф v_u вдоль оси, параллельной оси вращения Земли:

$$v_u = v_N \cos \varphi + v_{UP} \sin \varphi.$$

При наличии «GPS-курса» ψ^{GPS} , вычисленного по координатам маркеров запускной камеры, разность:

$$\psi^{ИИМ} - \psi^{GPS} = \frac{v_E}{u \cos \varphi},$$

будет характеризовать уровень восточного дрейфа.

Основные модели и алгоритмические решения

Для решения задачи навигации дефектоскопа использован информационный подход [4], согласно которому показания инерциальных датчиков используются как основная информация для построения навигационного решения – решения БИНС, а измерения одометров, информация о координатах маркеров используется для коррекции результатов навигационного счисления. Поскольку задача навигации дефектоскопа решается в режиме постобработки, то алгоритмы коррекции реализуются на основе моделей алгоритмов сглаживания.

Алгоритмы инерциальной навигации

Используются алгоритмы автономной трехкомпонентной навигации. Набор фазовых переменных состоит из 9 компонент:

- географические координаты (широта, долгота, высота) модельной точки

$$M': \varphi', \lambda', h';$$

- компоненты вектора относительной скорости движения

$$V' = (V'_1, V'_2, V'_3);$$

- углы истинного курса, крена и тангажа: ψ', γ', θ' .

Уравнения трехмерной навигации записываются в осях географического трехгранника с заданной ориентацией в азимуте, например, относительно-свободной ориентацией [4].

Уравнения вертикального канала не демпфируются какой-либо внешней высотой, поскольку интеграционные решения (о которых речь пойдет ниже) используют обратные связи по показаниям одометра, устраняющие известную экспоненциальную неустойчивость вертикального канала.

Модели одометра

В идеализированной ситуации одометр рассматривается как датчик, измеряющий пройденный путь $s(t)$ – скалярную величину вдоль продольной оси. Постулируется, что движение дефектоскопа происходит без проскальзывания, что позволяет интерпретировать его измерение как интеграл от скорости движения объекта, все время направленной по продольной оси (для определенности, 2-й оси):

$$V^{одо} = (0, V_2, 0)^T.$$

Реалистичная модель одометра, например, учитывает следующие факторы:

- инструментальные погрешности: погрешность масштабного коэффициента k ; наличие зоны нечувствительности измерения, обусловленная квантованием дискретного измерения;
- геометрические погрешности: «измерительная» ось одометра и продольная приборная ось ИИМ могут быть несоосны (это свойство характеризуется двумя малыми углами (χ_2, χ_3)); приведенный центр ИИМ - точка М и точка контакта колеса одометра с поверхностью трубы не совпадают.

Учет погрешности масштабного коэффициента, углов несоосности, приводит к следующей модели «векторного» скоростного измерения одометра

$$V^{odo} = (-\chi_3 V_2, (1+k)V_2 + \Delta V^{odo}, \chi_1 V_2)^T.$$

Здесь ΔV^{odo} – случайная погрешность измерения одометра.

Информационная избыточность показаний ИИМ и одометра

Информационная избыточность заключается в том, что с помощью измерений одометра, интерпретируемых либо как скоростная информация, либо как информация о приращении пройденного пути, модельных значений углов истинного курса, крена, тангажа, доставляемых алгоритмами БИНС, можно независимо определить второе позиционное решение - координаты $\varphi'', \lambda'', h''$ одометрической модельной точки M'' :

$$\begin{pmatrix} \Delta s_E'' \\ \Delta s_N'' \\ \Delta s_{UP}'' \end{pmatrix} = D' \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s_{i+1}'' \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_{i+1}'' = \lambda_i'' + \frac{\Delta s_E''}{R_E \cos \varphi_i'}, \quad \varphi_{i+1}'' = \varphi_i'' + \frac{\Delta s_N''}{R_N}, \quad h_{i+1}'' = h_i'' + \Delta s_{UP}''.$$

Здесь $\Delta s_{i+1}''$ - приращение показаний одометра на интервале $[t_i, t_{i+1}]$, D' - матрица ориентации между географической и приборной системами координат, определяемая алгоритмом БИНС, R_E, R_N – радиусы кривизны.

Два способа построения интеграционных решений

Первый способ основан на скоростной интерпретации показаний одометра. «Одометрическая» скорость используется для коррекции решений БИНС [2]. Второй способ [5] основан на позиционной интерпретации показаний одометра, построении отдельного кинематического одометрического навигационного решения – координат «одометрической» точки M'' . Далее эти координаты используются для позиционной коррекции БИНС. В обоих случаях координаты маркеров также являются позиционной корректирующей информацией.

Модели задачи коррекции и алгоритмов сглаживания

Методически задача интегрированной навигации дефектоскопа при помощи показаний инерциальных датчиков, одометра, данных о координатах маркеров сводится к решению стандартной линейной стохастической задачи оценивания:

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x + q, \quad z = H(t)x + r.$$

Компонентами вектора состояния x служат позиционные, скоростные, угловые ошибки БИНС, параметры принятых моделей инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, погрешность масштабного коэффициента одометра, углы несоосности его «измерительной» оси и продольной оси ИИМ, позиционные ошибки одометрического счисления. Вектор x можно представить в коагулированном виде

$$x = \begin{pmatrix} x_I \\ x_{II} \end{pmatrix}, x_I = \begin{pmatrix} x_I^{(1)} \\ x_I^{(2)} \end{pmatrix}, x_{II} = \begin{pmatrix} x_{II}^{(1)} \\ x_{II}^{(2)} \end{pmatrix}.$$

Здесь x_I – подвектор вектора состояния x характеризующий позиционные, скоростные, угловые ошибки БИНС (подвектор $x_I^{(1)}$), подвектор $x_I^{(2)}$ характеризует включенные в модель параметры гироскопического дрейфа и погрешностей акселерометров. Подвектор x_{II} характеризует ошибки одометрического счисления (подвектор $x_{II}^{(1)}$), инструментальные ошибки одометра, включая угловые ошибки его установки (подвектор $x_{II}^{(2)}$).

Тогда структурно модель динамической системы примет вид

$$\begin{pmatrix} \frac{dx_I}{dt} \\ \frac{dx_{II}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_I \\ x_{II} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_I \\ q_{II} \end{pmatrix}.$$

Здесь нулевой матричный угол отражает факт независимости ошибок инерциального счисления от одометрического.

Векторы измерения $z_I, z_{II}, z_{III}, z_{IV}$ строятся на основе позиционных решений БИНС и одометрического счисления, либо «скоростных» измерений одометра, координат маркеров:

$$z_I = H_I x_I^{(1)} + r_I, \quad z_{II} = H_{II} x_{II}^{(1)} + r_{II}, \quad z_{III} = H_{III} \begin{pmatrix} x_I^{(1)} \\ x_{II}^{(2)} \end{pmatrix} + r_{III}, \quad z_{IV} = H_{IV} \begin{pmatrix} x_I^{(1)} \\ x_{II}^{(2)} \end{pmatrix} + r_{IV}.$$

Векторы z_I, z_{II} соответствуют корректирующим измерениям при использовании информации о координатах маркерной точки, измерение z_{III} соответствует сигналу коррекции БИНС при помощи результатов непрерывного позиционного одометрического счисления, измерение z_{IV} соответствует сигналу коррекции БИНС, когда показание одометра интерпретируется как скоростная информация. Векторы $r_I, r_{II}, r_{III}, r_{IV}$ характеризуют соответствующие случайные погрешности измерений.

Задача коррекции БИНС в режиме постобработки ставится как задача сглаживания. Ее решение основано на известном приеме, когда сглаженная оценка определяется путем «склейки» двух оценок, полученных алгоритмами коррекции калмановского типа в прямом x^f и обратном x^b времени t .

Численная реализация фильтра Калмана предусматривает использование U-D факторизации ковариационной матрицы. Для реализации фильтра в обратном времени применяется приём, когда значение ковариационной матрицы P^b в конечной момент времени T (граничное значение) задаётся «большой» матрицей: $P^b(T) = m \cdot I, m \gg 1, I$ – единичная матрица.

Алгоритмы коррекции БИНС в прямом и обратном времени, в силу невысокого класса точности инерциальных датчиков, значительного времени работы дефектоскопа и, соответственно, режима навигации, реализуются в варианте введения обратных корректирующих связей в алгоритмы инерциального навигационного счисления [6]. Обратные связи строятся на моделях расширенного фильтра Калмана [7].

Выделим особенность, которая возникает здесь при реализации алгоритмов сглаживания. Обратные связи применяются к алгоритмам инерциального счисления как в прямом, так и в обратном времени. Далее «склейке» подвергаются не оценки ошибок навигационного счисления, а полученные оценки координат, скорости, углов ориентации, полученные при решении навигационной задачи в прямом и обратном времени. При этом в формальных математических операциях «склейки» участвуют навигационные параметры разных размерностей: угловые координаты [рад], высота [м], скорости [м/с], углы ориентации [рад].

Отметим, что при проходе дефектоскопа П-образных переходов возникает проблема вырождения угла тангажа, которую следует аккуратно регуляризовать при «склейке» оценок.

Практическое применение

В результате проведенных совместных работ МГУ сначала с компанией «Везерфорд трубопроводный сервис», затем с АО «Бейкер Хьюз технологии и трубопроводный сервис», последняя освоила излагаемую технологию навигационных решений и сейчас предлагает рынку навигационное обеспечение дефектоскопов со следующей спецификацией (www.bakerhughes.com).

Точность навигации в зависимости от расстояния между корректирующими маркерами

Marker distance (m)	Horizontal accuracy (m) at 80% certainty	Vertical accuracy (m) at 80% certainty
500	0.5	0.5
1000	1.0	1.0
1500	2.0	2.0

Также было показано, что использование периодической повторной калибровки инерциальных датчиков позволило повысить точность и стабильность навигационных определений.

Результаты испытаний макетного образца дефектоскопа «Оргэнергогаз «Саратоворгдиагностика»

Навигационный эксперимент был проведен в июне 2014 г. на магистральном трубопроводе "СОЮЗ". Длина инспектируемого участка была примерно 114 км. Диаметр газовой трубы 1420 мм. Средняя скорость дефектоскопа составляла величину около 3 м/с.

На газопроводе с помощью GPS приёмников было снято 60 реперных точек + 1 для определения начального азимута (заданного курса). Расстояние между маркерами варьировалось от 2 км (наиболее пространственное расстояние) до 7 км.

Перед пропуском дефектоскоп стоял включенным в камере запуска около 40 минут, что было использовано для решения задачи начальной выставки БИНС.

В камере наблюдалось вибрационное воздействие на дефектоскоп, связанное с запуском газа в камеру. Последние примерно 10 минут были выбраны для решения задачи начальной выставки.

Оценка точности интегрированных навигационных решений определялась следующими способами:

путём сравнения с координатами проверочных маркеров;

путём исключения координат маркеров из обработки и последующей проверки точности определения этих же координат навигационным алгоритмом;

сравнение с картой «Google Earth», на которой можно видеть рельефный профиль трубопровода и отобразенный профиль трассы дефектоскопа;

Предварительные результаты обработки показали, что:

на участках, где расстояние между маркерами составляет ~ 2 км, точность топографического привязки траектории движения дефектоскопа составляет 1-2 м.

на участках, где расстояние между маркерами составляет величину порядка 6 км, точность ухудшается до 15 м.

Выводы

Разработанная унифицированная методика и программно-математическое обеспечение комплексной обработки информации навигационных систем дефектоскопов показала свою эффективность. Показано, что для среднего класса точности инерциальных датчиков возможно обеспечение метровой точности навигационных определений при использовании одометров с высоким разрешением и километровой скважностью расположения маркеров.

Методика и программно-математическое обеспечение применима для схожих задач навигации подвижных объектов с аналогичным составом датчиков навигационной информации. К таковым относятся задачи навигации на железной дороге, задачи навигации наземных транспортных средств, топопривязчиков.

Литература

1. **Vavilova N.B. , A.A. Golovan, A.A. Panyov, A.V. Konon, A.A. Laptiev.** Development and testing of the navigation algorithms elaborated for pipeline inspection systems / 17th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2010.
2. **Панёв А.А. , Н.Б. Вавилова.** Задача навигации внутритрубного диагностического снаряда. «Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика.», N1, с 53-56, Москва, МГУ, 2011.
3. **Kozlov A.V. , I. Y. Sazonov, N.B. Vavilova, N.A. Parusnikov.** Calibration of an Inertial Measurement Unit on a Low-grade Turntable with Consideration of Spatial Offsets of Accelerometer Proof Masses / 20th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2013, pp.126-129.
4. **Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. 3-е издание, испр. и. доп. –М.: МАКС Пресс, 2011.
5. **Голован А.А., Никитин И.В.** Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть I. Вестник Московского Университета, 2015, №2, с. 69-72.
6. **Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, Н.А. Парусников.** К вопросу об информационно эквивалентных функциональных схемах в корректируемых ИНС / Механика твердого тела, N3, 2008.
7. **Maybeck, Peter S.** Stochastic Models, Estimation, and Control. Mathematics in Science and Engineering. 141-1. New York: Academic Press. 1979, p. 423. ISBN 0-12-480701-1.
8. **БЧЭ-500** компании «Оптолинк» <http://www.optolink.ru/ftpgetfile.php?id=36>.
9. **Акселерометры** АТ1104 компании «Темп-Авиа» <http://www.temp-avia.ru/index-17.htm>.